

# 奥氏体耐热不锈钢 310S 的抗高温氧化性能研究

杨照明, 韩静涛, 刘靖, 刘彪

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:**采用增重法研究了奥氏体耐热不锈钢 310S 在 700、900 和 1 000℃ 空气中高温氧化动力学, 并结合 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)及能谱分析(EDS)等手段,对氧化膜的形貌和组成进行了分析。结果发现,700℃ 时氧化速率比较稳定且氧化增重较小,其余温度下氧化增重大且遵循抛物线规律。该钢中 Cr 在高温时容易形成  $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  和尖晶石结构( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ )等保护性氧化膜,是 310S 钢具有良好的抗高温氧化性能的重要原因。

**关键词:**310S;奥氏体不锈钢;高温氧化;氧化膜;氧化动力学

中图分类号: TG142.73

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2006)14-0033-02

## Study on Oxidation Resistance of 310S Austenitic Stainless Steel

YANG Zhao-ming, HAN Jing-tao, LIU Jing, LIU Biao

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The high-temperature oxidation resistance of austenitic stainless steel 310S in air over the temperature range of 700~1 000℃ was studied by using the way of gain weight. The surface morphology, constituent and micro-structure of the oxidation scale was analyzed by using XRD, SEM and EDS techniques. Experimental results indicate that light oxidation is found on the alloy surface at 700℃, the alloy is attacked by oxidation seriously and the oxidation kinetic curves are approximately parabola within the temperature of 900~1 000℃. Cr forms  $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  and multi-layered scale ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ ) at high-temperature easily, which is important cause for excellent high-temperature oxidation resistance of austenitic stainless steel 310S.

**Key words:** 310S; austenitic stainless steel; high-temperature oxidation; oxidation scale; oxidation kinetics

耐热钢作为航空航天、化工工业中的重要材料,被广泛用于高温环境中。高温氧化是高温下最常见也是最重要的腐蚀破坏形式,因此研究和具有抗高温氧化性能的新材料对于我国的航空工业、化工及国防事业具有深远的意义<sup>[1]</sup>。

奥氏体耐热不锈钢 310S(0Cr25Ni20)是高铬镍奥氏体不锈钢,在氧化介质中具有优良的耐蚀性,同时具有良好的高温力学性能,因此它既可用于耐蚀部件又可以用于高温部件。

此前,国内外研究表明,在钢中加入某些合金元素是改善和提高合金抗氧化性能的重要举措之一,能否形成致密的氧化膜是合金抗高温氧化的关键。310S 奥氏体耐热不锈钢是一种具有良好的应用前景的高合金耐热钢,但是,有关 310S 钢抗高温氧化性能的研究还没有详细的研究报道,本

文就是针对其高温抗氧化性能进行研究。

## 1 实验方法

### 1.1 试样制备

试验样品选取奥氏体耐热不锈钢 310S,其化学成分(质量分数,%)为:0.08C,25.00Cr,20.00Ni,2.00Mn,1.00Si。

经感应电炉冶炼铸锭,热轧成 1 400 mm×300 mm×12 mm 的钢板,再线切割加工成 30 mm×10 mm×4 mm 的矩形试样,试样表面经 80# 到 1200# 砂纸逐级水磨,然后用金刚石研磨膏抛光,使试样的各个表面尽量光亮,先后用水、酒精、丙酮清洗,最后吹干备用。用千分尺测量试样的尺寸并算出其表面积,然后称量氧化前的坩埚和试样的总质量并做记录。

### 1.2 氧化实验

试样置于恒重的氧化铝坩埚内(焙烧坩埚的温度应该比试验温度高 50~100℃,并且至少焙烧

收稿日期:2006-04-21

作者简介:杨照明(1979-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要从事不锈钢高温性能的研究;电话:010-62332572

E-mail: yangzhaoming1979@126.com

两次以保证试验数据的精确),在静止的空气中加热到设定温度(700、900和1000℃)进行氧化实验,在高温电阻炉内进行恒温氧化试验,平行放入5个试样,每隔20h取出1个试样,1个试样对应1个数据点。循环氧化试验也是在高温电阻炉内进行,放入1个试样,每隔20h循环一次,共进行5次循环<sup>[2]</sup>,每个循环对应1个数据点。

取出试样后,冷却至室温,将试样连同坩埚一起测量质量变化,称重精度为0.1mg的AL204型精密电子天平上测量(为减少对称重环境的影响,空冷的时间每次均保持一致)。

采用X射线衍射法(XRD)分析氧化后试样的表面相组成,采用带有能谱仪的扫描电镜(SEM/EDS)进行氧化膜表面的显微组织观察和成分分析。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 氧化动力学分析

图1为310S奥氏体耐热不锈钢在不同温度下氧化100h的恒温氧化动力学曲线和循环氧化动力学曲线。采用增重法,通过计算试样单位面积、单位时间的氧化增重即氧化速率来评定其高温抗氧化性能,氧化速率越大,说明抗氧化性能越差,反之抗氧化性能越好。

由图1可见,氧化时间和氧化温度对310S不锈钢的氧化增重影响很大。该合金在900℃和1000℃下,氧化初期增重较大,其氧化的平均速率分别为0.2878和0.5381mg/cm<sup>2</sup>,经过约20h的氧化后有所减小,进入了稳态氧化阶段,氧化增重

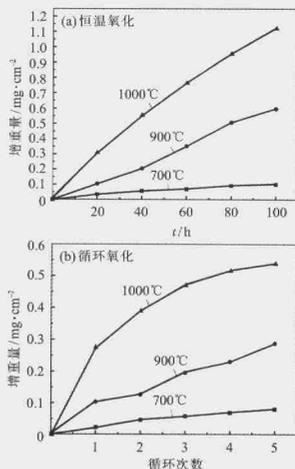


图1 310S在不同温度下空气中的氧化动力学曲线

趋于平缓,氧化速率降低,但一直处于上升趋势,图1(a)和(b)都符合抛物线规律。这说明在试验条件下310S表面形成了致密的保护性氧化膜,氧化膜无开裂,有效地阻止氧原子和其它腐蚀性气体扩散到合金中,提高了合金的使用寿命<sup>[1]</sup>。

### 2.2 氧化膜表面组成及形貌分析

图2为310S合金在不同温度下(1000、900和700℃)经过100h恒温氧化后试样表面形貌。可见,700℃氧化后试样表面仍能看见氧化前抛光的划痕,只是一部分失去金属光泽,合金发生轻微的氧化,氧化膜表面为金黄色和蓝色,氧化膜

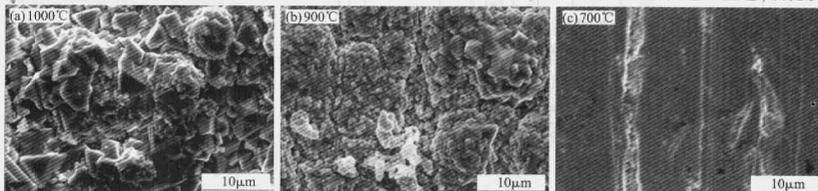


图2 310S合金在不同温度下经100h恒温氧化后的试样表面形貌

无开裂,有效地阻止了氧原子和其它腐蚀性气体扩散到合金中,提高了合金的使用寿命<sup>[2-6]</sup>;900、1000℃时氧化加剧,试样表面发黑,氧化膜均匀,1000℃下氧化膜表面出现局部脱落,随着氧化温度的升高,试样表面的粗糙度逐渐增大,氧化膜不

断增厚,表面晶粒逐渐长大。

### 2.3 氧化膜X射线衍射结果分析

对310S合金的氧化膜进行了X射线衍射分析,其结果如图3所示。可看出,在(下转第57页)

于晶粒细化和晶界总面积的增加,使得强度和硬度得到提高,所以,亚温淬火后,40Cr 钢能在韧度提高的同时仍然保持较高的强度和硬度(强度和硬度只是略有下降)。

(3) 钢的回火脆性是由于钢中 P 等有害杂质元素在奥氏体晶界偏聚的结果。P 是缩小奥氏体区元素,又有稳定铁素体的作用,因此 P 应优先存在于铁素体中。故当亚温淬火组织中有一定数量细小分散的铁素体时,P 等有害杂质元素主要集中在铁素体晶粒内,必然减少杂质在奥氏体晶界上的偏聚,从而降低因 P 等有害杂质元素在奥氏体晶界上偏聚引起的回火脆性。另外,由于晶粒细化使晶界总面积大大增加,则单位晶界面积上杂质含量明显减少,又进一步减少了 P 等有害杂质元素在奥氏体晶界偏聚对回火脆性的影响<sup>[4]</sup>。

## 4 结论

(1) 亚温淬火处理比常规热处理更有效提高 40Cr 钢的低温冲击韧度,使韧脆转变温度降低近

20℃,使 40Cr 钢能在更低的温度下使用,从而扩大 40Cr 钢的使用范围。

(2) 亚温淬火处理抑制 40Cr 钢的回火脆性,使不同回火冷却速度对回火脆性不敏感,即不管回火快冷或慢冷其冲出韧度都能提高。

(3) 亚温淬火处理使 40Cr 钢获得良好的综合力学性能,使材料的潜能得到进一步的发挥,应用更加广泛。

(4) 亚温淬火作为一种利用韧性相(铁素体)的强韧化工艺成为亚共析钢强韧化手段之一,值得推广应用。

## 参考文献:

- [1] 王戟.金属材料及热处理[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2004.
- [2] 雷延权.热处理工艺方法 300 种[M].北京:机械工业出版社,1993.
- [3] 冯卫红.40Cr 钢亚温淬火[J].通用机械,2003,(9):40-41.
- [4] 王明贤.金属学及热处理[M].北京:机械工业出版社,1988. [H]

(上接第 34 页)

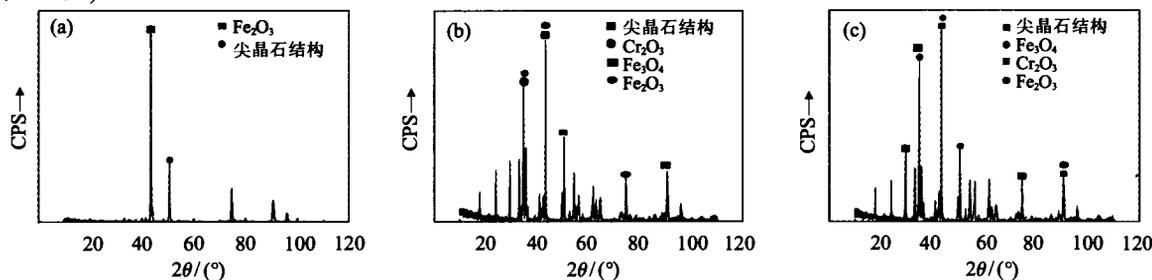


图 3 310S 合金氧化膜的 X 射线衍射图谱(a-700℃;b-900℃;c-1000℃)

700℃下氧化后,氧化膜主要有  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,而在 900℃和 1 000℃下氧化膜主要有  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  和尖晶石结构( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ ),根据合金化原理,如果加入的合金元素能生成尖晶石结构或复杂的尖晶石结构,会降低铁离子的扩散速度,提高抗氧化性。

## 3 结论

(1) 310S 合金在 900、1 000℃表面形成了致密的保护性的黑色氧化膜,在 700℃表面形成了金黄色和蓝色的氧化膜,氧化膜无开裂,有效地阻止了氧原子和其它腐蚀性气体扩散到合金中,提高了合金的使用寿命。

(2) 该钢中 Cr 在高温时容易形成  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 、

$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  和尖晶石结构( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ )等保护性氧化膜,是 310S 钢具有良好的抗高温氧化性能的重要原因。

## 参考文献:

- [1] 李美栓.金属的高温腐蚀[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [2] 朱日影,何业东,齐慧滨.高温腐蚀及耐高温腐蚀材料[M].上海:上海科学技术出版社,1993.
- [3] 郭明虎,王启民,柯培玲,等.Ni-Al 涂层对 Ti-22Al-26Nb 合金抗氧化性能的影响[J].金属学报,2005,41(3):312-316.
- [4] 吴莹,牛焱.Si 对 Ni-Al 合金 900℃氧化行为的影响[J].金属学报,2005,41(8):865-870.
- [5] 陶斌武,刘建华,李松梅.形状记忆合金  $\text{Ti}_{44}\text{Ni}_{47}\text{Nb}_9$  的抗高温氧化性能[J].金属学报,2005,41(6):633-637.
- [6] 孙玉福,邓想,石广新.ZG30Cr30Ni8Si2NER 耐热钢的抗氧化性研究[J].热加工工艺,2005,(3):19-21. [H]